

Горячев Е.М.,

магистрант,

Институт нефтегазового инжиниринга и цифровых технологий

ФГБОУ ВО «Уфимский государственный нефтяной

технический университет»

Россия, г. Уфа

ОЦЕНКА ВЛИЯНИЯ СМЕЩЕНИЯ КРОМОК И НАГРУЗОК НА ШТУЦЕРЫ НА НДС КОРПУСА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ЕМКОСТИ

***Аннотация:** В статье рассмотрена оценка напряженно-деформированного состояния корпуса горизонтальной технологической емкости с учетом смещения кромок в кольцевом сварном соединении и нагрузок на технологические штуцеры. Показано, что даже допустимое по нормативной документации смещение кромок может менять расположение зон повышенных напряжений, особенно при совместном действии давления, температуры и нагрузок от трубопроводной обвязки. Основное внимание уделено сравнению вариантов без смещения, со смещением центральной обечайки вверх и вниз. Полученные результаты могут быть использованы при анализе надежности емкостного оборудования на стадии монтажа и технического диагностирования.*

***Ключевые слова:** емкостное оборудование, обечайка, НДС, смещение кромок, штуцер, сварное соединение, прочность.*

***Annotation:** The article considers the assessment of the stress-strain state of a horizontal process vessel shell, taking into account edge displacement in a circumferential welded joint and loads on process nozzles. It is shown that even displacement allowed by standards can change the location of zones with increased stresses, especially under the combined action of pressure, temperature and piping*

loads. The main attention is paid to comparing variants without displacement, with upward and downward displacement of the central shell. The obtained results can be used when analyzing the reliability of vessel equipment at the installation and technical diagnostic stage.

Key words: *vessel equipment, shell, stress-strain state, edge displacement, nozzle, welded joint, strength.*

Надежность технологических емкостей во многом зависит не только от толщины стенки и выбранного материала, но и от того, насколько точно корпус собран и смонтирован. В реальных условиях даже качественно изготовленная емкость может получить дополнительные факторы нагружения. К ним относятся смещение кромок в кольцевых сварных соединениях, нагрузки от присоединенных трубопроводов, температурное воздействие, рабочее давление и местные особенности крепления штуцеров. В нормативных документах обычно задаются предельные допустимые отклонения, однако сама по себе допустимость отклонения еще не означает, что его влияние на напряженное состояние можно полностью не учитывать [1].

В курсовой была рассмотрена горизонтальная технологическая емкость внутренним диаметром 2400 мм, работающая при расчетном давлении 0,1 МПа и температуре 200 °С. Корпус включает левую, центральную и правую обечайки, соединенные кольцевыми сварными швами. Толщина стенки принята равной 14 мм. Для материала корпуса использована низколегированная сталь 09Г2С-14, расчетный предел текучести которой при температуре 200 °С составляет около 247 МПа. Такая постановка задачи позволяет оценить не абстрактную оболочку, а достаточно близкую к реальной технологическую емкость с опорами, штуцерами и монтажными особенностями.

Для построения расчетной схемы была разработана трехмерная модель корпуса в ПК «КОМПАС-3D». Модель включала корпус, технологические штуцеры и опорные элементы. Разбиение на конечные элементы выполнено в системе АРМ FEM. Такой подход удобен тем, что геометрическое отклонение не задается условно через коэффициент, а вводится прямо в модель. За счет этого можно увидеть не только величину максимальных напряжений, но и место их концентрации. В практическом смысле это важно, потому что при контроле технического состояния опасны не средние напряжения по корпусу, а локальные участки, где возникает перегрузка.

Допускаемые нагрузки на штуцеры входа и выхода продукта определялись в ПК «ШТУЦЕР-МКЭ». В расчет были включены штуцеры А и В диаметром Ду500, а также штуцер Г диаметром Ду150. Для оценки влияния трубопроводной обвязки рассматривались варианты с нагрузками, равными 50 % и 100 % от допускаемых значений. Такой набор вариантов дает возможность проследить, насколько быстро растут напряжения при переходе от условно мягкого режима к предельному расчетному нагружению.

Смещение кромок в кольцевых сварных соединениях задавалось в вертикальном направлении. Величина смещения была принята 2,4 мм. Это значение соответствует предельно допустимой величине для обечаек толщиной 14 мм по зависимости $0,1s+1$, указанной в ГОСТ 34347-2017 [1]. Были рассмотрены три основные схемы: корпус без смещения кромок, смещение центральной обечайки вверх относительно соседних обечаек и смещение центральной обечайки вниз. По смыслу эти варианты близки к ситуации, когда при сборке корпуса кромки стыкуемых обечаек не совпали по высоте, но отклонение осталось в пределах допуска.

Сценарии расчета были разделены на несколько групп. В первой группе корпус рассматривался без нагрузок на штуцеры и без смещения кромок. Во второй группе прикладывались нагрузки на штуцеры без учета смещения. В третьей и четвертой группах анализировалось смещение центральной

обечайки вверх без нагрузок и с нагрузками на штуцеры. В пятой и шестой группах аналогично рассматривалось смещение центральной обечайки вниз. Такое разделение удобно для понимания вклада каждого фактора: отдельно рабочего давления и температуры, отдельно трубопроводной обвязки, отдельно геометрического отклонения, а затем их совместного действия.

Полученные значения максимальных эквивалентных напряжений по Мизесу приведены в таблице 1. Вариант без смещения и без нагрузок на штуцеры дал значение 28,2 МПа. При нагрузках 50 % напряжения выросли до 47,5 МПа, а при нагрузках 100 % достигли 109,3 МПа. Уже по этим значениям видно, что нагрузка от трубопроводной обвязки оказывает заметное влияние на корпус. При этом смещение кромок само по себе меняет напряжения намного слабее, но в сочетании с нагрузками может немного повысить максимум и сместить опасную зону ближе к кольцевому сварному соединению.

Таблица 1.

Максимальные эквивалентные напряжения по Мизесу при смещении кромок и нагрузках на штуцеры

Вариант	Без нагрузок, МПа	50 % нагрузок, МПа	100 % нагрузок, МПа
Без смещения кромок	28,2	47,5	109,3
Смещение вверх 2,4 мм	29,3	48,3	110,0
Смещение вниз 2,4 мм	29,7	49,0	111,6

По данным таблицы видно, что при смещении кромок вверх максимальные напряжения при полном уровне нагрузок увеличились с 109,3 до 110,0 МПа. При смещении кромок вниз значение стало равным 111,6 МПа. Разница с вариантом без смещения составила 2,3 МПа. На первый взгляд такое увеличение кажется небольшим. Однако для сварного соединения важна не только величина максимума, но и то, где именно этот максимум возникает. Смещение кромок формирует локальную геометрическую ступеньку, а она

работает как концентратор напряжений. Поэтому при диагностике такую зону нельзя оценивать только по общему запасу прочности корпуса.

При сопоставлении вариантов расчета было показано, что наибольший рост максимальных напряжений связан с нагрузками на штуцеры. Если сравнить базовый вариант без нагрузок и вариант со 100 % допускаемых нагрузок на штуцеры, увеличение составляет примерно 3,8 раза. Это связано с тем, что штуцеры вводят в корпус локальные силы и моменты. Особенно заметно влияние штуцеров большого диаметра, так как в зоне их приварки нарушается равномерность оболочки и возрастает чувствительность к дополнительным нагрузкам.

Смещение кромок действует иначе. Оно не столько резко повышает общий уровень напряжений, сколько меняет характер их распределения. При смещении вверх и вниз общая картина остается похожей, но максимум становится немного выше при направлении вниз. Это можно объяснить сочетанием изгибного эффекта в зоне кольцевого шва и местной работы цилиндрической оболочки. В реальной емкости такой участок может дополнительно нагружаться при температурных деформациях, вибрации трубопроводов и изменении положения опор.

Отдельно стоит отметить, что полученные максимальные значения при проектной толщине стенки остаются ниже расчетного предела текучести стали 09Г2С-14. Даже при полном уровне нагрузок и смещении кромок вниз максимум 111,6 МПа не достигает 247 МПа. Поэтому по одному критерию прочности корпус сохраняет запас. Но такой вывод нельзя воспринимать как основание для игнорирования отклонения. При длительной эксплуатации важны повторяемость нагрузок, коррозионное утонение, качество сварного соединения и возможность развития дефектов именно в зоне концентрации.

Результаты хорошо согласуются с работами, где было показано влияние монтажных отклонений на оболочковые конструкции и трубопроводную обвязку [4, 5]. В этих работах также отмечается, что геометрическое

несовпадение элементов может давать локальный рост напряжений даже тогда, когда внешняя нагрузка кажется небольшой. Для емкостного оборудования это особенно важно, потому что корпус обычно работает как тонкостенная оболочка, а значит чувствителен к нарушениям формы и местным изгибам.

В практической части курсовой был важен не только расчет максимального значения, но и выбор зон, которые требуют внимания при диагностировании. В качестве таких зон могут рассматриваться участки кольцевых сварных соединений, где присутствует смещение кромок, зоны приварки штуцеров А и В, а также участки рядом с опорными элементами. Если на одном участке одновременно находятся крупный штуцер, сварной шов и геометрическое отклонение, вероятность появления локальной перегрузки возрастает. В такой ситуации контроль только по паспортным данным может быть недостаточным.

Для применения результатов на практике можно выделить несколько расчетных признаков потенциально опасной зоны. Во-первых, это наличие перехода формы, например ступеньки от смещения кромок. Во-вторых, это близость к штуцеру большого диаметра. В-третьих, это действие внешних сил и моментов от трубопроводной обвязки. В-четвертых, это совпадение зоны отклонения с участком, где по модели наблюдается повышение напряжений. Совпадение этих признаков не означает обязательное разрушение, но указывает на необходимость более внимательного контроля.

На стадии изготовления и монтажа целесообразно фиксировать не только сам факт соответствия смещения кромок допуску, но и его направление, место расположения по корпусу, близость к штуцерам и опорам. Без такой информации расчетная модель будет менее точной. Например, два одинаковых по величине смещения могут давать разный результат, если одно находится в свободной части обечайки, а другое расположено рядом со

штуцером или опорой. В итоге расчет с учетом фактической геометрии дает более понятную картину работы корпуса.

При эксплуатации емкости полученные данные могут быть полезны для планирования контроля. Если смещение кромок находится в зоне, где дополнительно действуют нагрузки от трубопровода, при неразрушающем контроле следует уделять внимание кольцевому сварному соединению и прилегающей зоне основного металла. Для такой проверки подходят визуальный и измерительный контроль, ультразвуковой контроль сварных соединений, толщинометрия и оценка фактических нагрузок на штуцеры. При необходимости расчетная модель может уточняться по результатам натурных измерений.

Проведенная оценка показала, что нормативно допустимое смещение кромок 2,4 мм для рассматриваемой емкости не приводит к потере прочности при проектной толщине стенки. При этом такое отклонение нельзя считать полностью нейтральным. Оно влияет на распределение напряжений и становится более значимым при совместном действии нагрузок на штуцеры. Следовательно, при анализе технического состояния корпуса важно рассматривать не один дефект или один фактор, а их сочетание.

В итоге можно сделать вывод, что для рассматриваемого корпуса решающим фактором роста максимальных напряжений стали нагрузки на технологические штуцеры. Смещение кромок в пределах допуска дало меньший прирост, но указало на возможность появления локальных зон концентрации. Для повышения надежности емкостного оборудования необходимо учитывать фактическую геометрию сварных соединений, реальные нагрузки от трубопроводной обвязки и расположение штуцеров относительно кольцевых швов. Такой подход позволяет заранее выделить участки, где контроль технического состояния должен быть более тщательным.

Использованные источники:

1. ГОСТ 34347-2017. Сосуды и аппараты стальные сварные. Общие технические условия. - М.: Стандартинформ, 2018. - 73 с.
2. ГОСТ 34233.1-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Общие требования. - М.: Стандартинформ, 2018. - 44 с.
3. ГОСТ 34233.2-2017. Сосуды и аппараты. Нормы и методы расчета на прочность. Расчет цилиндрических и конических обечаек, выпуклых и плоских днищ и крышек. - М.: Стандартинформ, 2018. - 66 с.
4. Rubtsov A.V., Kulakov P.A., Arkhipova K.S., Mukhametzyanov Z.R., Zakirnichny E.G. Stress-deformed state of the container with the presence of an displacement of the butt edges in the ring welded joint of the body // Journal of Physics: Conference Series. - 2021. - Vol. 1889. - 042077. DOI: 10.1088/1742-6596/1889/4/042077.
5. Kulakov P.A., Rubtsov A.V., Abushakhmin A.A., Yakubova P.R., Greb A.V. Investigation of stress-strain state of pipeline hoist taking into account installation displacements // Journal of Physics: Conference Series. - 2022. - Vol. 2373. - 082026. DOI: 10.1088/1742-6596/2373/8/082026.
6. Rubtsov A.V., Arkhipova K.S., Kulakov P.A., Afanasenko V.G., Zubkova O.E., Mukhametzyanov Z.R. Modeling of the stress-deformed state of a capacitive apparatus with geometric deviations when mounting on a foundation // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. - 2021. - Vol. 1181. - 012022. DOI: 10.1088/1757-899X/1181/1/012022.